文章编号:1001-5078(2022)03-0399-08

·光纤传感及光通讯技术 ·

利用免疫算法优化设计的宽带大增益拉曼光纤放大器

巩稼民,朱泽昊,雷舒陶,张运生,刘 芳,吴艺杰 (西安邮电大学通信与信息工程学院,陕西西安710121)

摘 要:为提高拉曼光纤放大器(RFA)的增益带宽和输出增益、改善增益平坦度,本文以掺铒 碲基光纤作为放大介质,使用 6 个泵浦光设计了一款能够实现对 C + L 波段共 100 nm 带宽信 号光平坦放大的拉曼光纤放大器。在设计过程中,针对拉曼光纤放大器模型中的非线性优化 和组合优化问题,采用免疫算法配置泵浦光波长和功率的方法来解决,同时保证拉曼光纤放大 器具有高增益和低增益平坦度的输出。最后通过 MATLAB 数值模拟,在 1530~1630 nm 的增 益带宽范围内所设计的拉曼光纤放大器的平均增益为 35.46 dB,增益平坦度为 0.85 dB。 关键词:拉曼光纤放大器;掺铒碲基光纤;免疫算法;增益平坦 中图分类号:TN929.11 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.015

Broadband high gain Raman Fiber Amplifier optimized by immune algorithm

GONG Jia-min, ZHU Ze-hao, LEI Shu-tao, ZHANG Yun-sheng, LIU Fang, WU Yi-jie

(College of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: To improve the gain bandwidth, output gain and gain flatness of Raman Fiber Amplifier (RFA), an Erbiumdoped tellurium-based fiber is used as the amplification medium to design a Raman Fiber Amplifier which can realize the smooth amplification of 100 nm bandwidth signal in C + L band. During the design process, the nonlinear optimization and combinatorial optimization problems in Raman Fiber Amplifier model, immune algorithm is used to optimize the wavelength and power of pump light, and ensure the output of Raman Fiber Amplifier with high gain and low gain flatness at the same time. By MATLAB numerical simulation, the average gain of the designed Raman amplifier is 35. 46 dB, and the gain flatness is 0.85 dB.

Keywords: Raman Fiber Amplifier; erbium-doped tellurium-based fiber; immune algorithm; gain flatness

1 引 言

随着光通信网络持续不断地发展及5G系统的 商用化和6G战略目标的提出,未来的光通信网络 将对系统容量和传输带宽提出更高的要求^[1]。实 现信号的快速放大、拓展光信号的传输带宽和提升 密集波分复用系统的容量已经成为光通信研究领域 的关键性问题。拉曼光纤放大器(Raman Fiber Amplifier,RFA)具有噪声低、响应速度快、增益平坦范 围大和能够实现全波段放大的特点,成为实现上述 目标的方法之一^[2]。近年来,碲酸盐玻璃光纤由于 其具有高非线性、大折射率和宽拉曼频移的特点,已 经广泛应用在宽带拉曼光纤放大器、掺 Tm³⁺或

基金项目:国家自然科学基金项目(No.61775180);国际科技合作计划项目陕西省重点研发计划项目(No.2020KWZ-017)资助。 作者简介:巩稼民(1962-),男,教授,博士,主要研究方向为光通信。E-mail:gjm@xupt.edu.cn 通讯作者:朱泽昊(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为光通信.E-mail:18035709330@189.cn 收稿日期:2021-06-23;修订日期:2021-08-07

Er³⁺碲酸盐光纤放大器和波长转换器件中,成为研 究的热点。在 RFA 应用方面,国内外以碲基光纤作 为增益介质所做的研究有:2002年, A. Mori 等人以 长度为250 m的碲基光纤作为增益介质,使用4路 泵浦光所设计 RFA 带宽达到 160 nm, 增益超过 10 dB,噪声系数低于 10 dB^[3];2018 年,巩稼民等人 使用6路泵浦光设计出了平均输出增益为25.518 dB,增益平坦度为1.34 dB,放大带宽为56 nm 的 RFA^[4]; 2019年, G. D. de Andrade 等人仅使用 3个 泵浦,每个泵浦的功率均小于800 mW,实现了平均 增益约为10 dB,增益平坦度在3 dB 以内的 RFA,其 增益带宽范围为 1520~1600 nm^[5]。可以看到,以 上研究中所设计的 RFA 无法在带宽、增益和增益平 坦度三个方面达到最优,必须采用一种快速有效的 算法对 RFA 的3个指标进行优化设计,以满足未来 光通信网络对放大器的需求。

本文所设计的 RFA 以掺铒碲基光纤作为增益 介质,使用六路泵浦光前向抽运的方式,实现对C+ L 波段共 100 路信号光的放大,在对泵浦光的波长 和功率进行配置时,应用免疫算法(Immune Algorithm,IA)进行优化计算。免疫算法具有全局搜索 能力、多样性保持机制和鲁棒性强^[6]的特点,能够 有效解决 RFA 模型中非线性最优化和组合优化的 问题。最终在100 nm 带宽内实现了输出高增益的 同时增益平坦度也很低的宽带大增益拉曼光纤放大 器。在此基础上,分析了光纤中泵浦光和信号光的 功率沿光纤长度的变化,以及在放大过程中所产生 的双向瑞利(Double Rayleigh Backscattering, DRBS) 噪声和自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)噪声对系统的影响,最后对所设计 RFA 的输 出增益的影响因素进行分析,为设计出性能更加优 越的宽带大增益 RFA 奠定理论基础。

2 理论基础与结构设计

2.1 RFA 理论模型

考虑泵浦光之间、信号光与泵浦光之间的受激 拉曼散射效应,以及光纤中的传输损耗、各路光产生 的双向瑞利散射噪声和自发辐射噪声建立拉曼耦合 微分方程如下^[7]:

$$\pm \frac{\mathrm{d}P_j}{\mathrm{d}z} = \sum_{v_i > v_j} \frac{g_{\mathrm{R}}(v_i - v_j)}{K_{\mathrm{eff}}A_{\mathrm{eff}}} P_i P_j - \sum_{v_k < v_j} \frac{v_j}{v_k} \frac{g_{\mathrm{R}}(v_j - v_k)}{K_{\mathrm{eff}}A_{\mathrm{eff}}} P_j P_k - \alpha_j P_j + \gamma_j P_j +$$

$$2hv_{i}\sum_{v_{i} > v_{j}} \frac{g_{\mathrm{R}}(v_{i} - v_{j})}{K_{\mathrm{eff}}A_{\mathrm{eff}}}P_{j} \cdot \left[1 + \frac{1}{\mathrm{e}^{h \in v_{i} - v_{j} \lor KT} - 1}\right] \cdot \Delta v$$
$$(i, j, k \in [1, \cdots, N])$$
(1)

式中, P_i 、 P_j 、 P_k 分别为第i、j、k路信道的信号光 功率; ν_i 、 ν_j 、 ν_k 分别为它们所对应的信号光频率; z为传输距离; α_j 为第j路光信号光在光纤中的损耗系 数; γ_j 表示第j 信道的瑞利散射系数; K_{eff} 为偏振因 子, 一般取2; A_{eff} 为光纤有效截面积; h 为普朗克常 量; K 为波尔兹曼常量; T 为光纤绝对温度; N 为传输 光的总路数; $g_R(\nu_i - \nu_j)$ 为i、j 两路信号光之间的拉 曼增益系数; $g_R(\nu_j - \nu_k)$ 为j、k 两路信号光之间的 拉曼增益系数; $g_R(\nu_j - \nu_k)$ 为j、k 两路信号光之间的

$$g_{v_j}(\Delta v) = g_R(\Delta v) \cdot \nu_j / \nu_0$$
 (2)
式中, $g_R(\Delta v)$ 是泵浦光频率为 v_0 时测得的拉曼增益谱。

对于前向泵浦结构采用四阶 Runge-Kutta 法对 拉曼耦合微分方程求解。为了设计能够输出高增益 的同时增益平坦度也很低的 RFA,将免疫算法的目 标函数设置为输出增益与增益平坦度的熵:

$$f = \frac{G}{\Delta G} \tag{3}$$

$$G = 10 \lg \frac{P_j(L)}{P_j(0)} \tag{4}$$

$$\Delta G = G_{\max} - G_{\min} \tag{5}$$

式中, $P_j(0)$ 为第 j 路信号光在光纤初始位置的光 功率; $P_j(L)$ 为其在光纤传输距离为 L 处的光功率; G_{max} 和 G_{min} 为拉曼光纤放大器输出增益的最大值和 最小值, ΔG 为增益平坦度。

2.2 掺铒碲基光纤的拉曼增益谱

在仿真中所使用的增益介质为 TLZ 碲基光纤, 其玻璃组分为 65TeO₂-15Li₂O-20ZnO, 掺 E_{i2}O₃ 的浓 度为 0.5 mol %,其在泵浦波长为 532 nm 时测得的 拉曼增益谱如图 1(a)所示^[8]。可以看到,在拉曼频 移为为 225 ~ 1160 cm⁻¹的范围内,掺铒碲基光纤的 拉曼增益系数均远远大于石英光纤,而且其峰值增 益出现在 725 cm⁻¹处,大于图 1(b)中石英光纤的峰 值增益位置(396 cm⁻¹,约 13.2 THz),这使得其能 够工作在石英光纤无法放大的工作波段;另外,其在 725 cm⁻¹处的峰值增益高出石英光纤(396 cm⁻¹处, 约 1.0 × 10⁻¹³ m/W)3 个数量级,意味着只需很短的 光纤长度就能产生足够的非线性,这节省了成本,是 分立式拉曼光纤放大器的理想增益介质。在模拟计 算中,采用高斯曲线对拉曼增益谱拟合。





2.3 结构设计

所设计的宽带大增益 RFA 结构如图 2 所示, $\lambda_1 ~\lambda_{100}$ 是光发射机输出的 1530~1630nm 带宽内 的 100 路信号光波长, $\lambda_{p1} ~\lambda_{p6}$ 为6 个泵浦光波长, 通过光复用器将它们耦合进长度 L 为4.5 m 的掺铒 碲基光纤中,在光纤中泵浦光通过受激拉曼散射效 应向信号光转移能量,使得信号光被放大,最后通过 波分解复用器将 6 路泵浦光滤除,100 路信号光分 别被其对应的接收机接收。



OMU—光复用单元 Optical Multiplex Unit; ODU—光解复用单元 Optical Demultiplex Unit 图 2 宽带大增益拉曼光纤放大器的结构 Fig. 2 Structure of broadband large gain Raman Fiber Amplifier

- 3 优化仿真与分析
- 3.1 免疫算法

生物的免疫机制是通过产生抗体消灭入侵的病 原体(抗原),免疫算法就是将生物免疫系统的一些 行为引入到传统的仿生算法中,人工构造出的一种 新型智能优化算法^[9]。1959年,澳大利亚的病毒学 家和免疫学家 Burnet 提出了获得性免疫的克隆选 择理论^[10];1974年,Jerne发展了免疫网络学说,以 此来解释适应性免疫系统的运作原理^[11]。在随后 的几十年里,免疫算法得到学者们的广泛研究。目 前该算法已广泛涉及组合优化、控制工程和人工智 能等诸多领域^[12-14]。其算法步骤如下:

1)随机产生初始种群并计算个体亲和度、抗体 浓度和激励度。亲和度用来衡量两个个体之间的相 似度,通过抗体向量之间的欧氏距离来计算:

$$I(x_{i}, x_{j}) = \sqrt{\sum_{k=1}^{L} (x_{i,k} - x_{j,k})^{2}}$$
(6)

式中, x_i 和 x_j 分别表示第 i和第 j个抗体向量; $x_{i,k}$ 和 $x_{j,k}$ 分别为抗体 i和抗体 j的第 k 维; L 为抗体向量的总 维数;抗体浓度用来衡量种群多样性的程度,定义为:

$$D(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N} S(x_i, x_j)$$
(7)

式中, N 为抗体个数; $S(x_i, x_j)$ 表示抗体 i 和抗体 j 之间的相似度,表示为:

$$S(x_{i}, x_{j}) = \begin{cases} 1, & A(x_{i}, x_{j}) < s \\ 0, & A(x_{i}, x_{j}) \ge s \end{cases}$$
(8)

式中, A(x_i,x_j) 表示它们之间的亲和度; s 为相似度 阈值。抗体激励度用来衡量抗体质量的好坏,由抗 体的亲和度和抗体浓度共同决定,其计算表达式 如下:

$$I(x_i) = \beta \cdot A(x_i) - \gamma \cdot D(x_i)$$
(9)

式中, β、γ为两个激励度系数;最后将抗体按照激励度的大小进行排序。

2) 对激励度前 N/2 个个体进行免疫操作,包括 克隆、变异和克隆抑制;最后计算免疫个体的亲和 度、抗体浓度和激励度,计算方法同步骤(1)。

3)随机生成 N/2 个个体的新种群,并计算个体 亲和度、抗体浓度和激励度;将步骤(2)中免疫种群 和随机种群合并,按激励度排序,进行免疫迭代。

4)判断是否满足终止条件:若满足则结束搜索 过程,输出优化值;若不满足,则继续进行迭代优化。

3.2 参数选择与优化

在使用免疫算法对 RFA 模型优化之前,需要设 置算法的基本参数,如表1所示。在忽略(1)式中 后两项噪声的情况下,由于每路泵浦光包含波长和 功率两方面信息,6路泵浦光共有6个波长和6个 功率,故每个抗体的维度 D 是 12;抗体种群 N 的选 取范围一般在5D~10D,为提高算法的全局搜索能 力,将种群个数N设置为120;算法达到最大进化代 数G时会停止运行,并将最优解输出,G的范围一般 在100~500,针对本研究中的RFA模型一般在运行 至150代左右时目标函数值会趋于收敛,故将G设 置为200;变异概率 M 用来衡量种群的多样性程度, 将 M 设置为 0.8 能够保证算法具有较高的全局搜 索能力:抗体克隆倍数 C 决定了算法的局部搜索能 力,尽管数值越大搜索能力越高,但也会提高算法的 计算量,一般取5~10倍;由于泵浦光的波长和功率 的搜索范围不同,因此在迭代优化时需要对它们的 激励度系数和相似度阈值分别设置,在表1中 β 、 s_1 和 γ、s,分别是对波长和功率进行迭代优化时的激 励度系数和相似度阈值,通过多次试验按表1设置 时优化结果较为理想。为实现 100 nm 带宽内的泵 浦光优化配置,所设计的 RFA 的其他仿真参数设置

如表 2, 基于表 1 和表 2 所设置的参数, 就可以对 RFA 模型进行优化, 运行 5 次优化算法的结果如表 3 所示。

表1 基本优化参数

Tab. 1 Basic optimization parameters

Parameter name	Values	
Number of immunized individuals N	120	
Immune Individual Dimensions D	12	
Maximum number of immune iterations G	200	
Variability probability M	0.8	
Incentive coefficient β , γ	2,1	
Similarity threshold s_1 , s_2	0.9,0.0675	
Number of clones C	10	

表2 RFA 的其他仿真参数

Tab. 2 The other simulation parameters of RFA

Parametername	Values		
Wavelength range of signal light/nm	[1530,1630]		
Power of signal light/mW	0.01		
Fiber length∕m	4.5		
Wavelength range of pump light/nm	[1360,1445]		
Power range of pump light/W	[0.1,1]		
Loss factor of pump light/(dB \cdot km ⁻¹)	25		
Loss factor of signal light/(dB \cdot km ⁻¹)	23		
Rayleigh scattering coefficient/(m ⁻¹)	7×10^{-8}		
Planck constant/ $(\mathbf{J} \cdot \mathbf{s})$	6. 626×10^{-34}		
Boltzmann constant/(J·K ⁻¹)	1. 38 $\times 10^{-24}$		

表 3 五组优化结果对比

Tab. 3	Comparison	of five	groups of	of op	timization	results
--------	------------	---------	-----------	-------	------------	---------

	Values				
Parameter name	А	В	С	D	Е
λ_1 /nm	1368. 0217	1369. 4840	1367.6140	1363. 7198	1366. 3619
λ_2 /nm	1386. 0217	1388.0702	1383. 8516	1372. 1584	1383. 7618
λ_3 /nm	1391. 3035	1409. 3280	1388. 3814	1386. 2480	1385. 7618
λ_4 /nm	1413. 7889	1415.8661	1412. 7651	1412. 3980	1412. 6526
λ_5 /nm	1432. 7508	1433.7190	1431.9148	1429. 2432	1431.2718
λ_6 /nm	1443.0352	1444. 5212	1441. 7413	1442. 3315	1441. 3344
P_1 /W	0.8572	0. 9994	0. 7725	0. 7470	0. 8246
P_2 /W	0. 9778	0. 9995	0. 7399	0. 3439	0. 2867
P_3 /W	0. 1898	0. 1352	0. 5651	0. 9825	0.9816
P_4 /W	0. 5299	0. 4444	0. 5423	0. 3796	0. 5652
P_5 /W	0. 2267	0. 2221	0. 2571	0. 2205	0. 2236
P_6 /W	0. 2037	0. 1773	0. 2059	0. 1968	0. 2199
\bar{G} / dB	35. 2467	35. 2313	35. 4143	34. 9791	35. 4580
$\Delta G / \mathrm{dB}$	0. 9395	0. 8776	1.0285	2.0149	0. 8473

对比表 3 中的五组数据,尽管这五次搜索均取 得了 35 dB 左右的平均输出增益,但每组的增益平 坦度却不尽相同,其中增益平坦度最差的是 D 组的 2.0149 dB,最理想的是 E 组的 0.8473 dB,而且 E 取得了 35.4580 dB 的平均输出增益是这五组中最 高的,因此 E 组的输出结果最优,将该组的结果作 为拉曼光纤放大器的泵浦光参数。E 组参数下各路 信号光的输出增益曲线如图 3 所示。



为进一步研究光纤中所传输光的功率沿光纤长 度的变化情况,绘制了100路信号光和6路泵浦光 的光功率随光纤长度的变化曲线,如图4和图5 所示。





Fig. 4 The powers of 100-channel signal lights vary with the fiber length 在长度仅为 4.5 m 的掺铒碲基光纤中,带宽范围在 1530~1630 nm 的 100路信号光在光纤初始位置的光功率是 0.01 mW,经过光纤中的受激拉曼散射效应,信号光从泵浦光处获得能量,各路信号光在光纤末端位置处的平均输出功率是 34.37 mW,输

出功率是入射时的 3400 倍以上。观察信号光功率 变化的整个过程,100 路信号光并没有在 6 路泵浦 光的共同作用下平稳快速地被放大,而是出现了先 "放大"后"补偿"的现象,这与采用级联结构的拉曼 光纤放大器^[15]的作用原理相类似。这也证明了采 用免疫算法对 RFA 模型进行优化的有效性,算法可 以在不考虑各路传输光相互作用的情况下,通过对 6 路泵浦光参数的合理配置,使得 100 路信号光在 光纤末端实现增益平坦。





从图 4 中可以看出,光纤长度从 0 增加到 2 m 时,信号光在6路泵浦光的作用下得到不同程度 的放大,其中短波长的信号光被放大程度最大,在 L=2 m 位置处波长为 1530 nm 的信号光的功率达 到了138.73 mW;随后光纤长度在2~4.5 m 范围 内,100路信号光进入"补偿"部分,在光纤的末端 实现功率收敛。在光纤中传输的泵浦光一方面要 克服光纤中的传输损耗,另一方面要通过受激拉 曼散射效应不断地向信号光转移能量,使信号光 放大,从图5可以看到,在L=2m处时6路泵浦光 的功率已经消耗殆尽,因此100路信号光在"补 偿"阶段即2~4.5 m 的范围内的能量来源只能是 已经被放大了的信号光内部。在这个过程中,由 于短波长和长波长信号光之间也存在受激拉曼散 射效应,二者之间也会发生能量转移,因此从图中 可以看到短波长信号光既要向长波长信号光转移 能量,又要克服光纤中的传输损耗,导致其功率迅 速衰减,而长波长信号光从短波长信号光那里获 得能量,从而功率增加,最终通过信号光之间的相 互作用实现了增益平坦。

由图1可知,掺铒碲基光纤具有很高的拉曼增益

系数,高出传统的硅基光纤3个数量级,在放大带宽 较小时,由于信道间隔很窄信号光之间受激拉曼散射 效应不明显,而本文所设计的 RFA 的增益频谱达到 了 100 nm,最短波长 1530 nm 与最长波长 1630 nm 之 间相差约 12 THz 的频移宽度,这两路信号光之间的 拉曼增益系数达到 0.5×10⁻¹⁰ m/W,这也远远高出 石英光纤拉曼增益谱的峰值增益。因此,在光纤 2 ~4.5 m 的范围内即使没有泵浦光的作用,这 100 路信号光也能通过自身内部较为强烈的受激拉曼散 射效应使得输出功率趋近一致,最终达到输出增益 平坦的结果。

在信号光被放大的过程中,放大的自发辐射 噪声和双向瑞利散射噪声是影响 RFA 性能的两个 主要噪声来源,基于表2中的物理量采用四阶 Runge-Kutta 法对式(1)中的噪声项进行数值求 解,各路信号光产生的 ASE 噪声和 DRBS 噪声增 益如图 6 所示。通过数值仿真,所设计的 RFA 各 路信号光产生的 ASE 噪声的平均增益为 1.6359 dB, DRBS 噪声的平均增益为 1.5141 dB。 从图6可知,相对于短波长来说,长波长信号光产 生噪声增益更高。其中,100路信号光产生的 DRBS噪声增益较为平坦,噪声的增益范围是 [1.4930 dB, 1.5793 dB], 而 ASE 噪声增益波动很 大,其增益范围是[1.3053 dB,2.7765 dB]。在 1530~1580 nm 的范围内, DRBS 噪声增益大于 ASE 噪声增益,而在1580~1630 nm 范围内, DRBS 噪声 增益远小于 ASE 噪声增益。



3.3 影响因素分析

3.3.1 光纤长度对拉曼光纤放大器的影响 图 7 所示为 RFA 其他参数不变的情况下,将光 纤长度从0~8m依次设置,所得到的平均增益和增 益平坦度变化曲线。可以看到,随着光纤长度的不 断增加,平均输出增益先平稳上升,然后在长度为 4.5m的位置处达到峰值增益,随后缓慢下降。起 初,光纤长度的增加会使泵浦光和信号光之间的相 互作用更加充分,因此各路信号光所获增益不断增 加;在达到峰值增益后,由于信号光要克服光纤中的 传输损耗,因此所获增益会出现逐渐下降的趋势。

光纤长度在0~4.5 m 的范围内增益平坦度先 增大后减小,在4.5 m 处达到最优,当光纤长度超过 4.5 m 后线性增加,平坦度开始恶化。结合图4 可 知,光纤长度较短时,各路信号光的放大程度不一 样,信号光功率很难在较短的光纤长度内收敛到同 一功率值,而适当增加光纤长度,能使信号光在泵浦 光的作用下充分均匀的放大,才会有实现增益平坦 的可能,因此在本文的设计中,光纤长度设置为 4.5 m时的增益平坦度最理想。





Fig.7 Variation of average gain and gain flatness with fiber length 以上分析也证明了所设计的 RFA 存在饱和光 纤长度。因此,在设置光纤长度时,有必要考虑平均 增益和增益平坦度。在本文中,光纤长度设置为 4.5 m,保证了平均输出增益很高同时增益平坦度也

3.3.2 泵浦光功率对拉曼光纤放大器的影响

很理想,而且节省了光纤资源。

为了使信号光的增益相等,各波长信号光应 获得相同的能量,这并不意味着六路泵浦光的功 率应该相等设置,这是因为在多泵浦 RFA 结构中 也存在泵浦光之间的能量传递。为了研究多泵浦 之间的能量转移,验证泵浦光的功率是否需要相 等设置,保证 RFA 的其他参数保持不变,将6路泵 浦光功率均等配置进行仿真。图8显示了不同泵 情况。

功率配置方案下平均增益和增益平坦度变化 数

将6路泵浦光功率从0~0.8 W 依次设置,可 以看到平均增益随着泵浦光功率的增加先升高后趋 于平缓,逐渐达到增益饱和状态,维持在约30 dB。 因此,由于饱和增益的存在,相等设置的6路泵浦光 功率与输出增益并不是正相关。而增益平坦度则一 直随着功率的增加而逐渐恶化,仅在4.5 m 位置出 现一个局部最小值。这是因为泵浦光之间的相互作 用也是影响增益平坦的重要因素,功率增加不仅会 加剧泵浦光和信号光之间作用,也会使泵浦光之间 的相互作用更加剧烈,在功率设置为0.8 W 时增益 平坦度甚至恶化到了40 dB 以上。





Fig. 8 Variation of average gain and gain flatness with pump power

因此,6 路泵浦光功率相等设定会导致增益平 坦度变差,无法满足对 RFA 性能的要求,因此在2.2 节中采用优化算法对不同波长的泵浦光功率进行优 化配置,使得各路信号光的输出增益平坦。

4 结 论

本文采用掺铒碲基光纤作为增益介质,通过免 疫算法优化配置泵浦光的参数,设计了一款分立式 宽带大增益拉曼光纤放大器,该 RFA 具有输出增益 高、增益平坦度好和增益频谱宽的特点。通过模拟 仿真,该 RFA 的平均输出增益为 35.4580 dB,增益 平坦度为0.8473 dB,放大带宽达到100 nm,能够覆 盖光纤通信常用的C+L 波段。与现有的研究结果 相比,不仅将放大带宽扩展到100 nm,而且保证了 较高输出增益情况下,增益平坦度小于1 dB。同时 分析了泵浦光与信号光功率沿光纤长度的变化,使 用四阶龙格库塔法对信号光产生的噪声增益进行了 数值求解,其中 ASE 和 DRBS 噪声的平均噪声增益 均小于2 dB,最后针对影响 RFA 输出性能的两个重 要因素进行了仿真分析。所设计的 RFA 具有结构 简单、增益光纤长度短和应用灵活的优点,为适用于 未来光通信网络下的高非线性拉曼光纤放大器的设 计与优化提供了参考。

参考文献:

- [1] Yu Shaohua, He Wei. Latest survey on optical fiber communication [J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2020, 50(9):1361-1376. (in Chinese)
 余少华,何炜. 光纤通信技术发展综述[J]. 中国科学: 信息科学,2020,50(9):1361-1376.
- [2] Li Xiaolin. Summary of patent analysis of optical fiber raman amplification technology [J]. China Science and Technology Information, 2019, (10): 24 25, 27. (in Chinese)
 李晓琳. 光纤拉曼放大技术专利分析综述[J]. 中国科

技信息,2019,(10):24-25,27.

- [3] Mori A, Masuda H, Shikano K, et al. Ultra-wide-band tellurite-based fiber Raman amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5):1300-1306.
- [4] Gong Jiamin, Ding Zhe, Li Siping, et al. Multi-pumped tellurite-based Raman fiber amplifier based on Gaussian fitting of gain spectrum [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(6):245 - 1 - 245 - 16.
- [5] De Andrade G D, Rocha H R O, Segatto M E V, et al. Study and optimization of Raman amplifiers in telluritebased optical fibers for wide-band telecommunication systems[J]. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2019, 18(2):219 - 226.
- [6] Qiao Junfei, Li Fei, Yang Shengxiang, et al. An adaptive hybrid evolutionary immune multi – objective algorithm based on uniform distribution selection [J]. Information Sciences, 2020, 512:446 - 470.
- Min B, Lee W J. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis [J].
 Ieee Photonics Technology Letters, 2000, 12 (11): 1486 - 1488.
- $\label{eq:constraint} \begin{array}{c} [8] & \mbox{Dias D T, Gonalves A, Somer A, et al. Raman gain coefficient of Er^{3+} doped $TeO_2 Li_2O ZnO$ glasses[J]. Jour-$

nal of Materials Science Materials in Electronics,2019,30 (18):16917 - 16921.

- [9] Li Lingjie, Lin Qiuzhen, Liu Songbai, et al. A novel multiobjective immune algorithm with a decomposition-based clonal selection [J]. Applied Soft Computing, 2019, 81:105490.
- [10] Burnet F M. The clonal selection theory of acquired immunity[M]. London: Cambridge University Press, 1959.
- [11] Jerne N K. Towards a network theory of the immune system[J]. Annual Immunology, 1974, (125):373-389.
- [12] Quwaider M, Shatnawi Y. Neural network model as Internet of things congestion control using PID controller and immune-hill-climbing algorithm[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2020, 101:102022.
- [13] Bao Juan, Liu Xiangyang, Xiang Zhengtao, et al. Multi-objective optimization algorithm and preference multi-objec-

tive decision-making based on artificial intelligence biological immune system [J]. IEEE Access, 2020, 8: 160221 - 160230.

[14] Bao Ziyang, Yu Jizhou. Intelligent optimization algorithm and its MATLAB example[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018:68 - 84. (in Chinese) 包子阳,余继周. 智能优化算法及其 MATLAB 实例

[M].2版.北京:电子工业出版社,2018:68-84.

[15] Gong Jiamin, Zhang Yurong, Mao Junjie, et al. Wideband raman fiber amplifier combining multi-pumped and fiber cascaded[J]. Laser & Infrared, 2020, 50(3):350 - 356. (in Chinese)

巩稼民,张玉蓉,毛俊杰,等.多泵浦与光纤级联结合
的宽带拉曼光纤放大器[J].激光与红外,2020,50
(3):350-356.